UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

CASE POSTALE 6128, SUCCURSALE A, MONTRÉAL, QUÉBEC, H3C 3J7

LE PROJET "ONET 85" : LA PLANIFICATION DES OPÉRATIONS DE TRANSPORT LONGUE DISTANCE

par

François Soumis et Michel Sauvé

Cette étude a été publiée grâce à une subvention du fonds F.C.A.R. pour l'aide et le soutien à la recherche.

Université de Montréal
Centre de recherche sur les transports - Publication #457
Octobre 1985

Dépôt légal - 4e trimestre 1986

RÉSUMÉ

Dans le cadre du projet ONET, des milliers de participants devaient être transportés de leurs villes d'origine aux berges du fleuve. Le dépaysement garanti par ONET impliquait que des groupes se déplacent en sens opposé sur le territoire québécois.

On peut maintenant diminuer le kilométrage à vide en transportant les deux groupes avec le même véhicule. Des points de correspondance permettent d'échanger des groupes allant dans des directions opposées. Nous avons choisi de relaxer les contraintes de tournées pour résoudre un problème de réseau. La réalisabilité est ensuite facilement obtenue en construisant des tournées de façon heuristique.

Le modèle s'est avéré très utile pour la planification stratégique des opérations en permettant d'évaluer le coût de divers scénarios.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction. 1

2. Le problème du transport des participants 1

2.1 Les participants. 1

2.2 Affectation des groupes aux destinations et dépaysement 3

2.3 Les modes de transport. 3

3. Modélisation. 4

3.1 Un problème original. 4

3.1.1 Dépaysement et déplacement à vide 4

3.1.2 Le problème du retour 5

3.1.3 Notation et modèle. 5

3.2 Approche de sélection de tournées 8

3.3 Une approche de type réseau 9

3.3.1 Simplification au modèle. 9

3.3.2 Preuve. 11

3.4 Correspondances 14

3.4.1 Justification 14

3.4.2 Respect des contraintes de dépaysement. 14

3.4.3 Correspondances et solution opérationnelle. 17

3.4.4 Avantages et inconvénients. 18

3.5 Concept de tâches et solution opérationnelle. 18

3.6 Construction des itinéraires. 19

4. Planification stratégique 20

4.1 Description des données 20

4.2 Problématique 20

4.3 L'outil de planification. 21

4.4 Les résultats 21

4.4.1 Ordre de grandeur des coûts 21

4.4.2 Coût des contraintes de dépaysement 22

4.4.3 Distribution géographique de la capacité d'hébergement 22

5. Planification opérationnelle. 23
5.1 Construction d'une solution opérationnelle. 23
5.1.1 Retrait de correspondances. 23
5.1.2 Construction de tournées. 23
5.1.3 Fusion de tournées. 24
5.1.4 Fission de tournée. 24
5.1.5 Qualité des tournées. 25
5.2 Construction de l'horaire 25
5.3 Le produit final. 28

6. Conclusion. 28

Remerciements 29

Références. 30

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Solution avec dépaysement si déplacement à vide gratuit . 32
Figure 2 : Solution sans contrainte de dépaysement 32
Figure 3 : Solution avec dépaysement et facturation au kilomètre . . 32
Figure 4 : Structure des correspondances et réseau associé 33
Figure 5 : Coût total selon le dépaysement exigé pour scénario d'hébergement D4 34
Figure 6 : Coût total pour différents scénarios d'hébergement et de dépaysement 34
Figure 7 : Distribution des itinéraires selon le nombre de correspondances - Scénario D4 35
Figure 8 : Distribution des itinéraires selon le nombre de correspondances - Scénario D8 35
Figure 9 : Distribution des tournées selon la durée en heures, scénario D4, avant fusion-fission 36
Figure 10 : Distribution des tournées selon la durée en heures, scénario D4, après fusion-fission 36
Figure 11 : Distribution des tournées selon la durée en heures, scénario D8, avant fusion-fission 37
Figure 12 : Distribution des tournées selon la durée en heures, scénario D8, après fusion-fission 37
Figure 13 : Distribution des tournées selon le nombre de déplacements appartenant à un itinéraire avec correspondances - Scénario D4. 38
Figure 14 : Distribution des tournées selon le nombre de déplacements appartenant à un itinéraire avec correspondances - Scénario D8. 38

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de l'année internationale de la jeunesse, l'"opération de nettoyage de l'environnement territorial" (ONET) voulait sensibiliser les jeunes aux questions environnementales. Pour atteindre cet objectif, plusieurs dizaines de milliers de jeunes de 14 à 18 ans devaient participer, pendant une semaine de juillet 1985, au nettoyage des berges du Saint-Laurent.

En mars 1985, le Centre de recherche sur les transports de l'Université de Montréal (C.R.T.) reçut, des responsables de la logistique d'ONET, le mandat de développer des outils informatisés pour la planification stratégique et opérationnelle du transport des participants.

Cet article décrit le problème posé par le transport des participants et présente les méthodes utilisées pour sa résolution. L'échec du projet ONET, à cause de problèmes de financement et de recrutement, a malheureusement empêché notre travail de subir le test de la réalité. Nous présentons donc quelques résultats obtenus à partir de données synthétiques.

2. LE PROBLÈME DU TRANSPORT DES PARTICIPANTS

2.1 Les participants

Les participants au projet ONET sont recrutés dans tout le Québec. Le jour du départ, chacun d'eux doit se rendre à un point de rassemblement, généralement dans la ville la plus proche de chez lui, à l'heure fixée par ONET. De ce point, il est pris en charge par ONET, qui assure son transport jusqu'au lieu d'hébergement. À la fin de la semaine, il est ramené à son point de départ par ONET.

Les points de rassemblement, que nous appellerons aussi "origine", correspondent grossièrement à une centaine des plus grosses villes du Québec. Un ou quelques points précis de la ville sont choisis pour leur facilité d'accès, leurs possibilités de stationner les véhicules et d'accueillir les participants. Les points d'hébergement, que nous appellerons aussi "destination", correspondent à des villes riveraines. L'hébergement a lieu dans des polyvalentes et des centres de plein air.

Nous connaissons les nombres de participants partant de chaque origine, les besoins en "main-d'oeuvre" et les capacités d'hébergement à chaque destination. Cependant, entre le moment de la planification et le jour du départ, abandons et nouvelles inscriptions viendront modifier légèrement (moins de 5%) le nombre de partants. De plus, vu le caractère symbolique de l'opération, les besoins en main-d'oeuvre sont élastiques.

Pour assurer un contrôle et garantir la sécurité des participants (presque tous mineurs), chaque groupe de participants est encadré par un responsable du point de rassemblement au point d'hébergement à l'aller et vice versa au retour. Au moyen d'appel et de comptage, le responsable peut s'assurer que tout son groupe atteint sa destination. Il nous est apparu que la taille naturelle d'un tel groupe est égale à la capacité d'un véhicule, notre flotte étant formée de véhicules d'environ 40 places assises.

On peut facilement déterminer combien de groupes partiront d'une origine et combien arriveront à une destination. Il suffit de diviser le nombre de participants par la capacité d'un véhicule et d'arrondir à l'entier supérieur. Si le nombre total de groupes partants diffère du nombre total de groupes attendus (à cause des arrondis), on modifie les besoins en main-d'oeuvre des destinations les plus importantes.

Nous devons donc offrir, en fonction des inscriptions et des besoins en main-d'oeuvre, un nombre suffisant de sièges dans un nombre fixe de véhicules. La décision d'assigner un siège à un participant est laissée à une étape subséquente.

2.2 Affectation des groupes aux destinations et dépaysement

Un des objectifs secondaires d'ONET est de permettre au participant de découvrir un nouveau coin du Québec. Le "voyage" ou le dépaysement est aussi un important argument de vente auprès des jeunes. De fait, ONET s'engageait dans sa publicité à héberger chaque participant à plus de 100 kilomètres de son point d'origine. De plus, ONET voulait interdire certaines destinations aux participants d'une origine donnée.

On voulait aussi éviter les voyages trop longs qui pourraient s'avérer inconfortables. Hormis ces contraintes, on veut affecter chaque groupe à une destination de façon à minimiser les coûts.

La contrainte de dépaysement est un des aspects originaux du problème. En effet, elle implique des déplacements supplémentaires des participants.

2.3 Les modes de transport

L'autobus scolaire est le principal mode de transport envisagé par ONET. On peut croire que trois facteurs expliquent ce choix : l'économie, la souplesse et la disponibilité. En effet, notre objectif principal est de maintenir les coûts au plus bas niveau possible et l'autobus scolaire est le moyen le plus économique à notre disposition. L'utilisation est facturée au kilomètre parcouru avec un prix plancher pour chaque véhicule utilisé.

De plus, on peut déterminer l'itinéraire et l'horaire de chaque véhicule avec un minimum de contraintes. Chaque véhicule doit être ramené

à son point de départ et la tournée de chaque véhicule ne doit pas excéder une durée raisonnable pour assurer la sécurité des passagers et du conducteur. Le projet ayant lieu en été, l'importante flotte d'autobus scolaires québécoise est disponible. Ces véhicules sont distribués sur tout le territoire québécois.

Ces véhicules, dont les caractéristiques sont définies par des normes gouvernementales, ont tous des performances semblables. Ils ont notamment des capacités semblables. ONET a estimé que, compte tenu des bagages à placer dans l'autobus faute de soutes, une quarantaine de participants pouvaient voyager confortablement à bord d'un autobus scolaire.

Le problème du transport longue distance consiste donc à déterminer des tournées de véhicules de longueur raisonnable déplaçant les groupes de participants en respectant les contraintes de dépaysement tout en minimisant le kilométrage total parcouru par les véhicules.

3. MODÉLISATION

3.1 Un problème original

3.1.1 Dépaysement et déplacements à vide

Pour déterminer une solution à ce problème, nous devons prendre deux types de décisions : nous devons d'abord décider à quelle destination sera envoyé chaque groupe de participants. C'est le problème d'affectation des participants. D'autre part, nous devons décider quel véhicule effectuera chaque déplacement. C'est le problème de fabrication de tournées.

Les contraintes de dépaysement et le fait que nous payons les déplacements à vide rendent plus difficile le problème. En effet, la détermination d'une solution optimale exige que les deux problèmes soient résolus simultanément.

Par exemple, si seuls les déplacements productifs étaient facturés, chaque véhicule, après un déplacement productif, pourrait être renvoyé à son point d'origine, le problème devenant un problème de transport classique (voir figure 1). Il en est de même si on retire les contraintes de dépaysement car, après un déplacement productif, on ne pourrait faire mieux que de ramener le véhicule à son point d'origine (figure 2).

Dans notre cas, il est possible que les contraintes de dépaysement nous amènent à faire circuler des groupes en sens opposé. Par exemple, en échangeant des participants entre deux villes assez éloignées. Dans ce cas, il est économique de faire effectuer les deux déplacements par le même véhicule (figure 3).

3.1.2 Le problème du retour

On voit facilement que les problèmes de l'aller et du retour sont liés. En effet, si l'on choisit une solution pour l'aller, l'affectation des participants au retour est fixée, car on doit ramener chaque participant à son point d'origine. Pour régler ce problème, il suffit de choisir, comme solution au retour, le miroir de la solution à l'aller, les véhicules et les groupes parcourant les mêmes trajets à rebours.

Il suffit donc de solutionner de façon optimale le problème de l'aller pour obtenir une solution optimale pour le problème de l'aller et du retour.

3.1.3 Notation et modèle

Nous allons maintenant formuler mathématiquement le problème. Nous introduisons d'abord la notation nécessaire.

Soit L, l'ensemble des villes considérées,

O $\subset$ L, l'ensemble des origines,

D $\subset$ L, l'ensemble des destinations,

a_i, le nombre de groupes partant de i, $i \in L$ ($a_i = 0$ si $i \in L-O$),

b_i, le nombre de groupes arrivant en i, $i \in L$ ($b_i = 0$, si $i \in L-D$),

d_{ij}, la distance en kilomètres de i à j pour tout $(i,j) \in L^2$,

$A = \{(i,j) \in O \times D$ la destination j est un dépaysement acceptable pour l'origine i$\}$,

B $\subset L^2$, les arcs du réseau routier.

Par construction, nous avons

$$\sum_{i \in O} a_i = \sum_{j \in D} b_j \qquad (1)$$

A représente l'ensemble des déplacements qui dépayse suffisamment les participants. B représente le réseau routier interurbain.

Soit T, l'ensemble des tournées. Une tournée est formée d'un ensemble de déplacements productifs et de déplacements à vide qui forment une boucle. Aucune tournée n'est exclue de t en raison d'une longueur excessive. L'élimination de ces tournées sera assurée par l'objectif.

Soit p^t_{ij} le nombre de déplacements productifs de i à j pour la tournée t pour tout $(i,j) \in A$ et pour tout $t \in T$,

v^t_{ij} le nombre de déplacements à vide de i à j pour la tournée t pour tout $(i,j) \in B$ et pour tout $t \in T$.

Puisque chaque tournée est une boucle, nous aurons

$$\sum_{i\ (i,\ell) \in A} p^t_{i\ell} + \sum_{i\ (i,\ell) \in B} v^t_{i\ell} = \sum_{j\ (\ell,j) \in A} p^t_{\ell j} + \sum_{j\ (\ell,j) \in B} v^t_{\ell j} \qquad (2)$$

pour tout $\ell \in L$, pour tout $t \in T$

Le coût de chaque tournée tient compte du kilométrage total de la tournée, du prix plancher et d'une pénalité q^t permettant de restreindre la présence dans la solution optimale de tournées trop longues ou insatisfaisantes pour toute autre raison.

Soit c_{min}, le coût minimum d'une tournée,

c_{km}, le coût d'un kilomètre parcouru,

q^t, mesure des inconvénients associés à la tournée.

Le coût c^t d'une tournée $t \in T$ s'écrit alors :

$$c^t = q^t + \max\{ c_{min} , c_{km} (\sum_{(i,j)\in A} p_{ij}^t d_{ij} + \sum_{(i,j)\in B} v_{ij}^t d_{ij}) \}$$

Le modèle utilise trois types de variables : les variables de déplacements productifs, les variables de déplacements à vide et les variables de tournée.

Soit x_{ij}, le nombre de déplacements productifs de i à j pour tout $(i,j) \in A$,

y_{ij}, le nombre de déplacements à vide de i à j pour tout $(i,j) \in B$,

z^t, le nombre de tournées de type t, $t \in T$.

Le modèle s'écrit :

(M) $$\min \sum_{t\in T} c^t z^t \qquad (3)$$

s.a. $$\sum_{j \mid (i,j)\in A} x_{ij} = a_i \qquad \text{pour tout } i \in O \qquad (4)$$

$$\sum_{i \mid (i,j)\in A} x_{ij} = b_j \qquad \text{pour tout } j \in D \qquad (5)$$

$$x_{ij} \geq 0, \text{ entier} \qquad \text{pour tout } (i,j) \in A \qquad (6)$$

$$y_{ij} \geq 0, \text{ entier} \qquad \text{pour tout } (i,j) \in B \qquad (7)$$

$$x_{ij} = \sum_{t\in T} p_{ij}^t z^t \qquad \text{pour tout } (i,j) \in A \qquad (8)$$

$$y_{ij} = \sum_{t\in T} v_{ij}^t z^t \qquad \text{pour tout } (i,j) \in B \qquad (9)$$

$$z^t \geq 0, \text{ entier.} \qquad (10)$$

Les contraintes (4-7) décrivent le problème d'affectation des passagers. L'objectif (3) et les contraintes (10) décrivent le problème de fabrication de tournées. Les contraintes (8) assurent que les tournées choisies permettent les déplacements nécessaires des groupes. Les contraintes (9) sont purement descriptive ici, les y_{ij} étant libres.

Lorsque de longs déplacements sont imposés par la géographie du problème, ils forcent la présence dans la solution de tournées de longueur excessive. Nous discuterons en 3.5 une modification de la politique de transport et l'adaptation nécessaire du modèle réduisant ce problème.

3.2 Approche de sélection de tournées

Le modèle peut s'écrire en fonction des seules variables z^t en remplaçant simplement les x_{ij} par leur valeur en termes de z^t donnée par les contraintes (8). Le modèle devient, après permutation des sommations dans les contraintes (4) et (5) :

$$(MST) \quad \min \sum_{t \in T} c^t z^t$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{t \in T} \Big(\sum_{j \mid (i,j) \in A} p_{ij}^t \Big) z^t = a_i \qquad \text{pour tout } i \in O$$

$$\sum_{t \in T} \Big(\sum_{i \mid (i,j) \in A} p_{ij}^t \Big) z^t = b_j \qquad \text{pour tout } j \in D$$

$$z^t \geq 0, \; z^t \text{ entier.}$$

Il s'agit ici de choisir l'ensemble des tournées réalisant les déplacements productifs nécessaires au moindre coût. C'est un programme linéaire en nombre entier. Dans le contexte d'ONET, où on peut compter entre 130 et 200 contraintes et quelques milliers de variables, le coût de solution est certainement élevé.

3.3 Une approche de type réseau

3.3.1 Simplification au modèle

Les tarifs planchers typiques des transporteurs correspondent à des parcours de 250 à 350 kilomètres. Si un dépaysement de 100 kilomètres est exigé, la plus petite tournée couvrira au moins 200 kilomètres. Il nous est donc apparu raisonnable de négliger la question du tarif plancher.

Si nous supprimons de plus le terme de qualité des tournées ($q^t = 0$, pour tout $t \in T$), la fonction objectif porte seulement sur la distance parcourue et s'écrit alors en fonction des x_{ij} et y_{ij}. Si $c_{min} = 0$ et $q^t = 0$, pour tout $t \in T$, alors, utilisant (8) et (9) :

$$\sum_{t\in T} c^t z^t = c_{km} \sum_{t\in T} \Big(\sum_{(i,j)\in A} p^t_{ij} d_{ij} + \sum_{(i,j)\in B} v^t_{ij} d_{ij} \Big) z^t$$

$$= c_{km} \sum_{(i,j)\in A} d_{ij} \sum_{t\in T} p^t_{ij} z^t + \sum_{(i,j)\in B} d_{ij} \sum_{t\in T} v^t_{ij} z^t$$

$$= c_{km} \sum_{(i,j)\in A} d_{ij} x_{ij} + \sum_{(i,j)\in B} d_{ij} y_{ij}$$

pour tout $\ell \in L$.

Utilisant la propriété (2) des tournées, on peut aussi déduire des contraintes (8) et (9) que, pour tout $(x_{ij})_{(i,j)\in A}$, $(y_{ij})_{(i,j)\in B}$, $(z^t)_{t\in T}$ solution du modèle (3)-(10) et pour tout $\ell \in L$:

$$\sum_{t\in T} \Big(\sum_{i\,|\,(i,\ell)\in A} p^t_{i\ell} + \sum_{i\,|\,(i,\ell)} v^t_{i\ell} \Big) z^t = \sum_{t\in T} \Big(\sum_{j\,|\,(\ell,j)\in A} p^t_{\ell j} + \sum_{j\,|\,(\ell,j)\in B} v^t_{\ell j} \Big) z^t$$

D'où les égalités pour tout $\ell \in L$:

$$\sum_{i\,|\,(i,\ell)\in A} \sum_{t\in T} p^t_{i\ell} z^t + \sum_{i\,|\,(i,\ell)\in B} v^t_{i\ell} z^t = \sum_{j\,|\,(\ell,j)\in A} \sum_{t\in T} p^t_{\ell j} z^t + \sum_{j\,|\,(\ell,j)\in B} \sum_{t\in T} v^t_{\ell j} z^t$$

$$\sum_{i\,|\,(i,\ell)\in A} x_{i\ell} + \sum_{i\,|\,(i,\ell)\in B} y_{i\ell} = \sum_{j\,|\,(\ell,j)\in A} x_{\ell j} + \sum_{j\,|\,(\ell,j)\in B} y_{\ell j}$$

Et, en appliquant (4) et (5), on obtient :

$$b_\ell + \sum_{i|(i,\ell)\in B} y_{i\ell} = a_\ell + \sum_{j|(\ell,j)\in B} y_{\ell j} \qquad (11)$$

d'où, finalement :

$$\sum_{i|(i,\ell)\in A} y_{i\ell} - \sum_{j|(\ell,j)\in B} y_{\ell j} = a_\ell - b_\ell \qquad \text{pour tout } \ell\in L \qquad (12)$$

Si on remplace les contraintes (8) et (9) par la contrainte (12), on obtient le modèle :

$$(R) \quad \min \; c_{km} \sum_{(i,j)\in A} d_{ij}x_{ij} + \sum_{(i,j)\in B} d_{ij}y_{ij}$$

$$\sum_{j|(i,j)\in A} x_{ij} = a_i \qquad \text{pour tout } i\in O$$

$$\sum_{i|(i,j)\in A} x_{ij} = b_j \qquad \text{pour tout } j\in D$$

$$x_{ij} \geq 0, \text{ entier} \qquad \text{pour tout } (i,j)\in A$$

$$\sum_{i|(i,\ell)\in B} y_{i\ell} - \sum_{j|(\ell,j)\in B} y_{\ell j} = a_\ell - b_\ell \qquad \text{pour tout } \ell\in L$$

$$y_{ij} \geq 0, \text{ entier} \qquad \text{pour tout } (i,j)\in B$$

Ce modèle est séparable en deux problèmes de réseau, celui des véhicules pleins en $x = (x_{ij})_{(i,j)\in A}$ et celui des véhicules vides en $y = (y_{ij})_{(i,j)\in B}$.

Nous allons montrer de façon constructive que, pour toute solution de R en x et y, il existe $z(x,y) = (z^t)_{t\in T}$ tel que $(x,y,z(x,y))$ est solution de M.

On pourra alors conclure que, lorsque $c_{min} = 0$ et $p^t = 0$ pour tout $t\in T$, si (x^*,y^*) est solution optimale de R, $(x^*,y^*,z(x^*,y^*))$ est solution optimale de M, le modèle original.

Notre approche de solution consistera à résoudre d'abord R pour obtenir un ensemble de déplacements (productifs et à vide) minimisant le kilométrage. On construira ensuite un ensemble de tournées réalisant tous les déplacements.

Le modèle R étant un modèle de réseau, nous disposons d'algorithmes rapides et robustes pour le résoudre. Cependant, cette approche a l'inconvénient d'oublier la qualité des tournées au moment de l'optimisation.

3.3.2 Preuve

Nous voulons démontrer que, pour chaque solution (x,y) de R, il existe z(x,y) tel que (x,y,z(x,y)) est solution de M.

Considérons le réseau $G=(L, A \oplus B)$ et le flot $f=(x \oplus y)$ sur ce réseau.

Notons $E(\ell) \subset A \oplus B$, l'ensemble des arcs de $A \oplus B$ entrant en $\ell \in L$

$S(\ell) \subset A \oplus B$, l'un des arcs de $A \oplus B$ sortant de $\ell \in L$.

Pour prouver l'existence de z(x,y), il suffit de montrer que le flot f peut se décomposer en un nombre fini de circuits orientés portant un flot unitaire. Cette propriété découle directement du fait que, en chaque noeud $\ell \in L$, il entre et sort la même quantité de flot. En effet, si l'on calcule (3)-(4)+(12), on obtient :

$$\sum_{i|(i,\ell)\in A} x_{i\ell} + \sum_{i|(i,\ell)\in B} y_{i\ell} - \sum_{j|(\ell,j)\in B} y_{\ell j} - \sum_{j|(\ell,j)\in A} x_{\ell j} = (a_\ell - b_\ell) - (a_\ell - b_\ell)$$

$$\sum_{i|(i,\ell)\in A} x_{ij} + \sum_{i|(i,\ell)\in B} y_{ij} = \sum_{j|(\ell,j)\in A} x_{ij} + \sum_{j|(\ell,j)\in B} y_{ij}$$

$$\sum_{a\in E(\ell)} f_a = \sum_{a\in S(\ell)} f_a \qquad \text{pour tout } \ell \in L \qquad (13)$$

La preuve nécessite deux petits lemmes.

Soit un réseau G = (N,A) et un flot $f = (f_{ij})_{(i,j)\in A}$ sur ce réseau tel que

$$\sum_{j|(\ell,j)\in A} f_{\ell j} = \sum_{i|(i,\ell)\in A} f_{i\ell} \qquad \text{pour tout } \ell \in N$$

Lemme 1 : Si f est non-nul, il existe un circuit orienté de flot non-nul dans G.

Preuve : Soit $(t,s)\in A$ tel que $f_{ts} > 0$.

Cherchons, par marquage, une chaîne de diminution de flot de s à t dans G pour le flot f.

Si nous déterminons une telle chaîne $C_{(t,s)}$ alors $C_{(t,s)} \{t,s\}$ est un circuit orienté de flot non-nul et nous avons le résultat.

Supposons donc qu'il n'existe pas de chaîne de diminution de flot. Le marquage déterminera alors une coupe (S,T)

$$(s,t) \in S \times T,\ S \cap T = \emptyset,\ S \cup T = N$$

telle que

$$\sum_{(i,j)\in S\times T\cap A} f_{ij} = 0.$$

Par la propriété de f

$$\sum_{\ell\in S} \Big(\sum_{i\,|\,(i,\ell)\in A} f_{i\ell} - \sum_{j\,|\,(\ell,j)\in A} f_{\ell j} \Big) = 0.$$

d'où

$$\sum_{\ell\in S} \sum_{i\,|\,(i,\ell)\in A} f_{i\ell} - \sum_{\ell\in S} \sum_{j\,|\,(\ell,j)\in A} f_{\ell j} = 0$$

$$\sum_{(i,j)\in T\times S\cap A} f_{ij} + \sum_{(i,j)\in S\times S\cap A} f_{ij} - \sum_{(i,j)\in S\times S\cap A} f_{ij} - \sum_{(i,j)\in S\times T\cap A} f_{ij} = 0$$

$$\sum_{(i,j)\in T\times S\cap A} f_{ij} = \sum_{(i,j)\in S\times T\cap A} f_{ij} = 0$$

mais, par hypothèse

$$\sum_{(i,j)\in T\times S\cap A} f_{ij} > f_{ts} > 0$$

d'où contradiction.

Lemme 2 : Si g est le flot défini en faisant circuler une unité de flot sur un circuit orienté, alors

$$\sum_{i\,|\,(i,\ell)\in A} (f-g)_{i\ell} = \sum_{j\,|\,(\ell,j)\in A} (f-g)_{\ell j} \qquad \text{pour tout } \ell\in N.$$

Preuve : La preuve est triviale car

$$\sum_{i\,|\,(i,\ell)\in A} g_{\ell} = \sum_{j\,|\,(\ell,j)} g_{\ell j} \qquad \text{pour tout } \ell\in N.$$

D'où

$$\sum_{i\,|\,(i,\ell)\in A} f_{i\ell} - \sum_{i\,|\,(i,\ell)\in A} g_{i\ell} = \sum_{j\,|\,(\ell,j)\in A} f_{\ell j} - \sum_{j\,|\,(\ell,j)\in A} g_{\ell j} \quad \text{pour tout } \ell\in N$$

$$\sum_{i\,|\,(i,\ell)\in A} (f-g)_{i\ell} = \sum_{j\,|\,(\ell,j)\in A} (f-g)_{\ell j} \qquad \text{pour tout } \ell\in N.$$

C.Q.F.D.

On peut décomposer le flot f en une collection de circuits orientés en appliquant le processus suivant :

Étape 0 : $k=0$, $f^0=f$.

Étape 1 : Si $f^k=0$, terminer.

Étape 2 : Construire C^k, circuit orienté de flot non-nul et q^k un flot unitaire sur C^k.

Étape 3 : Poser $f^{k+1}=f^k-g^k$.

Étape 4 : Poser $k=k+1$ et retourner à l'étape 1.

La validité de ce processus est garantie par le lemme 1 qui garantit l'existence de C^k à l'étape 2 et par le lemme 2 qui nous assure que les f^k ont tous la propriété (13). Le processus est fini car $f^{\ell} > f^{\ell+1}$ pour tout ℓ k.

3.4 Correspondances

3.4.1 Justification

La distance entre certaines villes au Québec excède de beaucoup la distance maximale que peut parcourir un autobus scolaire (autonomie), compte tenu du fait qu'il doit revenir à son point de départ en un temps raisonnable. Pour effectuer des déplacements de groupes sur de longues distances sans devoir recourir à de trops longues tournées, on utilise des points de correspondance.

Un point de correspondance est un lieu où les véhicules peuvent s'échanger des groupes de participants. Par exemple, si une correspondance est installée à Québec, un premier autobus amène un premier groupe de Trois-Rivières à Québec et ramène à Montréal un second groupe arrivant du Lac Saint-Jean sur un deuxième véhicule. Un troisième autobus amènera notre premier groupe de Québec à Baie-Saint-Paul.

Typiquement, un véhicule circulant à 90 km/h pendant un maximum de dix heures a une autonomie de 900 km et ne peut donc transporter un groupe d'étudiants sur plus de 450 km puisqu'il doit revenir à son point d'origine.

On devra donc choisir suffisamment de points de correspondance pour que chaque déplacement d'une origine à une destination puisse se décomposer en segments de moins de 450 kilomètres via les points de correspondance.

3.4.2 Respect des contraintes de dépaysement

L'introduction des correspondances implique des modifications au problème des véhicules pleins du modèle R. Les correspondances doivent être introduites de façon à respecter les contraintes de dépaysement. En effet, dans le problème de transport en x, le respect des contraintes est assuré par la définition de l'ensemble des arcs A.

Il ne suffit pas d'ajouter un "transhipment node" pour permettre la correspondance. Nous perdrions alors toute information sur l'origine des groupes quittant la correspondance et un groupe pourrait être amené à la correspondance puis renvoyé à son point de départ, contournant ainsi les contraintes de dépaysement.

Le point de correspondance est donc éclaté en un petit réseau qui nous assure que

A) Les groupes passant par une correspondance ne reviennent pas sur leurs pas.

B) Les groupes partant d'une origine près de la correspondance ne peuvent terminer leur voyage que dans une destination éloignée de la correspondance.

C) La correspondance n'interdit pas de destination inutilement.

La géographie de la province de Québec, où la population est concentrée le long du fleuve Saint-Laurent et de la rivière des Outaouais, a facilité notre tâche. La grande majorité des déplacements se fait dans l'axe du fleuve. Il suffira donc de distinguer le "nord" et le "sud" de la correspondance.

La figure 4 décrit la structure de la correspondance où chaque noeud est identifié par trois lettres. La première lettre distingue les arrivées (A) des départs (D). La seconde distingue le nord (N) et le sud (S) et la troisième distingue les noeuds selon la distance des noeuds adjacents, soit près (P) ou loin (L). Un noeud est près lorsque la distance est inférieure à la demie de la distance assurant un dépaysement minimal. Lorsqu'une position est occupée par une astérisque, nous considérons l'ensemble des noeuds correspondant aux deux valeurs possibles de la lettre.

Chaque correspondance sera formée de huit noeuds, soit quatre noeuds arrivée (A**) et quatre noeuds départ (D**). Seuls des arcs allant

aux noeuds D** sortent des noeuds A** et seuls des arcs venant des noeuds A** entrent aux noeuds D**. On appelle ces arcs des arcs internes. Seuls des arcs venant des origines entrent aux noeuds A** et seuls des arcs allant aux destinations sortent des noeuds D**.

Pour passer par la correspondance, on va donc d'une origine, un noeud A** à un noeud D** et finalement à une destination. Les arcs internes sont construits de façon à satisfaire les critères A et B.

Quatre noeuds *S* (deux noeuds AS*, deux noeuds DS*) conduisent le trafic vers le sud. Les quatre autres noeuds *N* conduisent le trafic vers le nord. Il n'y a pas d'arc entre ces deux groupes, ce qui assure le respect de la condition A. Les noeuds AS* reçoivent les arcs en provenance d'origines au nord de la correspondance. Le noeud ASL reçoit les arcs venant d'origines éloignées de la correspondance. Un arc interne va du noeud ASL vers chaque noeud DS*. L'autre noeud ASP reçoit les arcs venant d'origines près de la correspondance. Un arc interne mène au noeud DSL. Ce noeud n'émet des arcs que vers les destinations rapprochées. Cette structure assure le respect de la condition B.

Pour chaque origine, un seul arc atteint la correspondance et, pour chaque destination, un seul arc arrive de la correspondance. De plus, l'arc direct entre l'origine et la destination est retiré du réseau si le détour par la correspondance n'augmente pas le kilométrage. La règle précédente admet une exception : si l'origine et la destination sont près de la correspondance, mais suffisamment loin l'une de l'autre, l'arc direct est conservé de façon à réaliser la condition C.

Pour permettre aux groupes venant de l'ouest du Québec d'aller vers le sud et vers le nord, les arcs arrivant de ces origines entrent en un cinquième noeud AL*. Ce noeud est relié par un arc interne aux quatre noeuds D**.

Pour assurer la réalisabilité, il faut ajouter des arcs entre les correspondances, mais de tels déplacements (navettes) sont peu souhaitables car ils impliquent des voyages longs avec deux correspondances. On peut cependant pénaliser leur coût pour en limiter l'usage.

3.4.3 Correspondances et solution opérationnelle

Notons d'abord que dans une solution optimale au problème des déplacements productifs avec correspondance, il entre et sort le même nombre de véhicules de chaque point de correspondance. On peut donc toujours construire un ensemble de tournées à partir de cette solution.

Cependant, l'affectation des groupes n'est plus uniquement déterminée, car on ne peut distinguer l'origine des groupes (flot) circulant sur un même arc interne. Il faudra donc déterminer l'affectation en pairant les groupes entrant et les groupes sortant de la correspondance.

De plus, les correspondances ont pour inconvénient d'ajouter une composante horaire à un problème de routage pur. Il devient maintenant nécessaire que le véhicule qui amène un groupe à la correspondance arrive avant le véhicule qui mènera ce groupe à sa destination. Dans certains cas, cela pourrait introduire un temps d'attente pour un véhicule, allongeant indûment une tournée.

Pour déterminer une solution opérationnelle, il faudra, une fois les problèmes de réseau résolus, réaliser trois opérations :

1) Construction des itinéraires : il s'agit de déterminer à quelle destination un groupe d'une origine donnée sera envoyé en sortant de la correspondance.
2) Construction des tournées : il faut préciser la méthode choisie pour obtenir des tournées de qualité pour les véhicules.
3) Construction de l'horaire : nécessaire pour assurer la synchronisation entre les itinéraires et les tournées.

Nous décrirons les méthodes utilisées pour la réalisation de ces trois opérations dans les sections 3.5, 5.1 et 5.2.

3.4.4 Avantages et inconvénients

L'addition des points de correspondance présente, au niveau technique, l'avantage de diminuer le nombre d'arcs du réseau. Lorsqu'un groupe d'origine O* et de destination D* se trouvent de part et d'autre d'une correspondance , les O* x D* arcs possibles sont remplacés par les O* + D* arcs de $o \in O^*$ vers i, puis de i vers $d \in D^*$. La somme est nettement inférieure au produit quand le nombre d'origines et de destinations est grand.

De plus, les correspondances n'impliquent pas beaucoup de kilométrage supplémentaire. Le réseau routier québécois est tel que le trajet le plus court entre deux points passe le plus souvent par la correspondance.

La correspondance implique cependant pour les participants un délai suplémentaire car on doit laisser une marge de sécurité pour la synchronisation. On peut aménager ce délai en pause-repas. La correspondance augmente aussi la complexité de la tâche des accompagnateurs et des conducteurs qui, dans une situation nouvelle et stressante, seront sujets à l'erreur.

3.5 Concept de tâches et solution opérationnelle

Du point de vue de la circulation des véhicules, la solution au problème de réseau définit l'ensemble des tâches qui devront être accomplies par les véhicules. Chaque tâche correspond au déplacement d'un véhicule du lieu i au lieu j. On définira une tâche pour chaque unité de flot x_{ij}, $(i,j) \in A$ (véhicule plein) et pour chaque unité de flot y_{ij}, $(i,j) \in B$ (véhicule vide).

Construire une solution opérationnelle correspond à associer trois valeurs à chaque tâche correspondant aux trois opérations définies en 3.4.3.

1) A chaque tâche correspondant à un déplacement productif, on doit associer un numéro de groupe permettant de suivre un groupe de son lieu de départ à son lieu de destination.
2) Chaque tâche se verra aussi assigner un numéro de tournée. L'ensemble des tâches portant le même numéro formera une tournée.
3) On assignera aussi à chaque tâche une heure de départ. C'est l'heure à laquelle l'autobus partira du lieu d'origine de la tâche.

3.6 Construction des itinéraires

Une fois introduite les correspondances, la destination finale des groupes d'une origine donnée n'est plus uniquement déterminée. En effet, à chaque noeud de la correspondance, arrivent ou partent des tâches correspondant à des groupes. Il faut donc choisir pour chaque tâche finissant à la correspondance une tâche commençant à la correspondance. On peut alors déterminer, pour chaque groupe, un itinéraire, soit une suite de tâches de son origine vers une destination en passant possiblement par des correspondances.

Nous avons décidé d'apparier tâche arrivant et tâche partant de la correspondance de façon à équilibrer la longueur totale des itinéraires. Pour chaque direction, nous ordonnons les tâches arrivant en ordre ascendant de longueur et les tâches partant en ordre décroissant de longueur. Il suffit d'apparier séquentiellement les tâches selon les ordres définis pour équilibrer grossièrement les distances parcourues par les groupes.

Pour construire un itinéraire, on choisit une tâche partant d'une origine et on progresse de tâche en tâche jusqu'à une destination. Les tâches décrivent les déplacements successifs du groupe. Chaque tâche peut ainsi se voir assigner un numéro d'itinéraire.

Nous pouvons alors déterminer combien de groupes vont de chaque origine à chaque destination. La matrice du nombre de groupes allant de i à j est appelée matrice d'affectation.

4. PLANIFICATION STRATÉGIQUE

4.1 Description des données

Comme nous l'avons déjà dit, le projet ONET n'a jamais eu lieu. Cependant, ONET nous a transmis les données d'un scénario synthétique pour l'étape de la planification stratégique.

Dans chaque ville, le nombre de participants recrutés est fixé à un pourcentage de la population des 14-18 ans dans la région environnante. On compte 80 origines. Les quantités de participants hébergés dans les 51 destinations correspondent grossièrement aux kilomètres de berge à nettoyer dans la région entourant chaque ville à raison de 30 mètres par participant. On aurait alors recruté 24 095 participants pour des besoins de 24 395.

ONET exigeait un dépaysement minimum de 100 kilomètres et avait défini toute une liste d'interdictions explicites. Par exemple, on exigeait que tous les gaspésiens soient amenés au sud de Matane. Nous avions évalué la capacité des véhicules entre 40 et 45 passagers, compte tenu des bagages. La vitesse moyenne était fixée à 100 km/hr et le coût à un dollar par kilomètre.

Les points de correspondance étaient Hull, Mont-Laurier, Québec, Baie-Comeau et Matane.

4.2 Problématique

Face à un problème complexe, de nombreuses questions devaient être résolues avant d'envisager la construction d'une solution opérationnelle :

1) De quel ordre de grandeur est le coût de l'opération? A priori, il est très difficile d'évaluer le coût d'une bonne solution à ce problème.
2) Combien coûtent les contraintes de dépaysement?

3) Quel est l'effet sur les coûts de la distribution géographique des capacités d'hébergement?

4.3 L'outil de planification

Pour répondre aux questions posées au niveau de la planification stratégique, il faut pouvoir calculer le coût et produire la matrice d'affectation pour de nombreux scénarios possibles. La construction des tournées et de l'horaire sont inutiles à ce stade.

Notre modélisation ramenant le problème à la résolution d'un problème de réseau pour lequel nous disposons d'algorithmes efficaces, nous avons pu développer très rapidement un programme ou module de planification stratégique. Ce programme permet d'obtenir en quelques minutes l'information recherchée pour un scénario. On pouvait donc évaluer plusieurs scénarios en quelques heures.

4.4 Les résultats

4.4.1 Ordre de grandeur des coûts

Au scénario original prévoyant 100 kilomètres de dépaysement et toute une série d'interdictions spécifiques, était associé un coût de 0,37 millions de dollars (MD). Ce coût correspond au coût de transport de 24 000 participants aller seulement.

Les déplacements à vide coûtent 0,115 MD et les déplacements productifs, 0,27 MD. Si nous retirons les contraintes de dépaysement, le problème des véhicules pleins devient identique au problème des véhicules vides. Pour une distribution donnée de la demande, le prix minimal pour réaliser l'opération, quel que soit le dépaysement, est donc égal à deux fois le coût des déplacements à vide, soit ici 0,22 MD. Les coûts supplémentaires imposés par le dépaysement se chiffrent alors à 0,14 MD. soit 60% de plus que le coût minimal.

4.4.2 Coût des contraintes de dépaysement

ONET considérait ce coût excessif et a réagi en abandonnant toutes les interdictions spécifiques, quitte à les rajouter à la pièce. Nous avons ensuite examiné l'influence du paramètre de dépaysement minimal sur le coût total (voir figure 5). On peut voir qu'il faut abaisser fortement le critère de dépaysement pour abaisser le coût de façon significative. On n'obtient que 11% de gain en passant de 100 à 50 kilomètres pour une affectation de qualité discutable.

4.4.3 Distribution géographique de la capacité d'hébergement

À l'examen des solutions et des données, on a constaté un important déséquilibre entre l'"offre" et la "demande" pour les différentes régions du Québec. Par exemple, l'hébergement excédait de beaucoup le nombre de participants disponibles en Gaspésie. Pour combler les besoins, des groupes partaient d'aussi loin que Montréal et Longueuil pour satisfaire les besoins à Gaspé et à Percé, parcourant près de 1 000 kilomètres. Les véhicules dans ce cas reviennent vides, doublant le coût de l'opération.

Nous avons donc analysé l'effet sur les coûts de déplacer entre Trois-Rivières et Québec les lits excédentaires de la Côte-Nord et de la Gaspésie. Plusieurs scénarios déplaçant jusqu'à plusieurs milliers de lits ont été testés. Les résultats résumés à la figure 6 montrent qu'une meilleure disposition des capacités d'hébergement peut abaisser les coûts de 0,32 MD jusqu'à 0,20 MD, une économie de 28%. Ce résultat a amené les responsables de la logistique-transport à interagir au maximum avec la section logistique-hébergement de façon à influencer la disposition des lieux d'hébergement.

5. PLANIFICATION OPÉRATIONNELLE

5.1 Construction d'une solution opérationnelle

Nous avons déjà décrit de quelle façon sont construits les itinéraires. Pour déterminer une solution applicable au problème, il faut construire les tournées et en déterminer l'horaire.

5.1.1 Retrait de correspondances

Chaque correspondance représente un délai pour les participants et rend plus difficile la synchronisation. Un itinéraire Montréal-Québec-Beauport, par exemple, contient une correspondance inutile.

Le retrait d'une correspondance j d'un itinéraire est une opération facile. On remplace simplement les tâches (i,j) et (j,k) par la tâche (i,k) pour éliminer la correspondance j.

Nous présentons aux figures 7 et 8 la distribution des itinéraires selon le nombre de correspondances pour deux scénarios d'hébergement (D4 et D8) avec un dépaysement de 100 kilomètres. La présence d'itinéraires comptant trois correspondances pour le scénario D4 est due au déséquilibre entre l'hébergement et le recrutement en Gaspésie et sur la Côte-Nord. Ces régions comptent peu d'habitants par kilomètre de berge.

5.1.2 Construction de tournées

Les tournées sont construites séquentiellement selon le procédé suggéré par la preuve. On commence avec le réseau courant des tâches. On choisit ensuite la tâche la plus longue (i,j) puis on calcule le plus court chemin de j à i dans le réseau courant. Le circuit orienté résultant est une tournée. Chaque tâche se voit associer un même numéro de tournée et les tâches du circuit sont retirés du réseau courant. Le procédé est repris jusqu'à ce que le réseau courant n'ait plus de tâche.

Cet algorithme glouton ne peut que tendre vers un ensemble de tournées équilibrées, et ne peut garantir la qualité des tournées. Nous avons conçu deux façons d'améliorer la solution : la fusion et la fission.

5.1.3 Fusion de tournées

Les tournées très courtes ne sont pas désirables, car le prix plancher pour l'usage d'un véhicule s'applique et engendre des coûts supplémentaires dont le modèle d'optimisation R n'a pas tenu compte. Cependant, une tournée courte peut être combinée à une autre tournée pourvu que les deux tournées passent en un même lieu et que leurs durées combinées ne soient pas trop longues.

Le problème de choisir les bonnes paires de tournées à assembler est un problème de couplage dont les coûts correspondent à une mesure de l'intérêt d'assembler deux tournées. Nous avons utilisé le nouvel algorithme de Lessard, Rousseau et Minoux [1] pour solutionner le problème de couplage.

5.1.4 Fission de tournée

La méthode de construction des tournées ne garantit aucunement que les tournées auront une durée acceptable. Il est donc possible de générer des tournées très longues, mais le réseau routier québécois et la position des correspondances font qu'il est difficile d'imaginer une tournée très longue qui ne comporte pas deux arrêts rapprochés.

Nous avons misé sur cette propriété pour améliorer notre ensemble de tournées en brisant les tournées trop longues en deux tournées plus courtes. Pour une tournée trop longue, on détermine les deux arrêts les plus rapprochés i et j qui séparent la tournée en deux tournées suffisamment longues. Si $T_{k\ell}$ est le chemin orienté de l'arrêt k à l'arrêt ℓ pour

la tournée T, alors, les ensembles $T_{ij} \cup \{(i,j)\}$ et $T_{ji} \cup \{(j,i)\}$ représentent deux tournées effectuant les mêmes déplacements productifs que T. Il faut ajouter au réseau le circuit de déplacement à vide $\{(i,j),(j,i)\}$.

Cela ajoute $2 \times d_{ij}$ à la distance totale parcourue et donc augmente le coût des opérations.

5.1.5 Qualité des tournées

L'expérience a prouvé que le premier ensemble de tournées généré est inacceptable. Pour nos deux scénarios types, une bonne partie des tournées initiales sont trop longues ou trop courtes (voir figures 9 et 11).

Ces ensembles de tournées sont ensuite modifiés par fission et fusion de tournées. La fusion de tournées s'avère très efficace pour éliminer les tournées trop courtes qui pourraient engendrer des coûts supplémentaires (voir figures 10 et 12). La fission de tournée permet de ramener les tournées à une durée acceptable pour l'opérateur du véhicule. Les coûts supplémentaires impliqués sont inférieurs à 0,5%, soit quelques milliers de kilomètres à vide.

5.2 Construction de l'horaire

Fixer l'horaire revient à assigner une heure de début à chaque tâche. On tient compte de 15 minutes pour les opérations d'embarquement et de débarquement lors d'un déplacement productif. Les temps de trajet sont fonction des distances et de la vitesse moyenne.

Dans cette application, le problème de mettre un horaire sur les tournées et itinéraires n'est pas un problème difficile, les décisions prises pour une tournée n'ayant d'influence que sur quelques autres tournées.

Lorsqu'un déplacement productif est une tâche d'un itinéraire avec correspondance, fixer l'horaire de la tournée fixe aussi l'horaire de l'itinéraire qui à son tour fixe l'horaire d'autres tournées. Si on assigne séquentiellement des horaires aux tournées, on peut théoriquement se retrouver avec une tournée dont deux déplacements productifs ont des heures de départ incompatibles. Cela n'est possible que lorsque au moins deux tâches d'une même tournée appartiennent à des itinéraires avec correspondances.

Cependant, la nature du problème et quelques précautions rendent cette éventualité peu probable.

De fait, pour une tournée dont tous les déplacements productifs impliquent des itinéraires sans correspondance, l'horaire de cette tournée n'a d'effet sur aucune autre tournée. On est donc libre de choisir l'horaire à notre guise.

L'horaire est alors déterminé de façon à terminer les déplacements productifs le plus tôt possible ou, de façon équivalente, à placer en dernier le plus long déplacement à vide. On peut insérer une période de dîner pour le conducteur entre deux déplacements productifs au centre de la journée.

On traitera en dernier les tournées comptant un seul déplacement avec correspondance. Si l'heure de départ est fixée, on terminera la construction de l'horaire en choisissant judicieusement la première tâche de la journée. Sinon, on peut fixer l'horaire à sa guise.

Dans les deux scénarios étudiés (voir figures 13 et 14), on fixera sans difficulté l'horaire pour 87% des tournées. La difficulté réside donc dans les 13% de tournées comptant plus d'un déplacement avec correspondance.

En effet, pour une telle tournée, il y a possibilité que les heures fixées sur deux tâches soient incompatibles. Notons d'abord qu'une tournée

ne peut toucher plus de deux correspondances car la distance entre les correspondances est près de la demie de l'autonomie des véhicules.

Si aucune heure n'est fixée et que la tournée ne touche qu'une seule correspondance; on fixera l'heure d'arrivée à la correspondance à une heure d'arrivée standard correspondant à l'heure du dîner. Le véhicule repartira après la période du dîner. De cette façon, un maximum de véhicules arriveront et partiront au même moment de la correspondance, facilitant ainsi la synchronisation. En effet, si certains déplacements avec correspondance ont leur heure déjà fixée, il est probable que ces heures correspondront aux heures standard.

Si une tâche touche à deux correspondances, le départ ou l'arrivée à l'une des deux correspondances sera non-standard, mais cela n'est un problème que si la tâche est au milieu d'un itinéraire avec deux correspondances. Si le véhicule fait la navette entre deux correspondances, et que les deux tâches sont au milieu d'itinéraires avec deux correspondances, l'horaire résultant fera que l'un des itinéraires se terminera très tôt ou très tard.

Les itinéraires avec deux correspondances sont donc source de problème. Cependant, on en compte très peu dans les solutions, car ils correspondent à de très longs voyages. On en compte sept dans le scénario D4 et aucun dans le scénario D8.

Si des problèmes se posaient malgré tout, il nous reste plusieurs possibilités. Par exemple, échanger, entre deux tournées, deux tâches de même origine et destination, briser une tournée difficile, etc.

Ajoutons qu'au moins 87% des tournées n'ont pas encore d'horaire lorsque nous assignons un horaire à une tournée difficile, ce qui nous laisse beaucoup de liberté.

5.3 Le produit final

Une fois construits les itinéraires, les tournées et l'horaire, on dispose de toutes les informations nécessaires pour gérer les opérations de transport. On peut donc produire les rapports essentiels au déroulement des opérations, soit :

1) Les feuilles de route des accompagnateurs indiquant le trajet parcouru, les autobus utilisés et l'horaire.
2) Les feuilles de route des conducteurs décrivant le trajet, les groupes transportés et les heures de rendez-vous.
3) La liste des groupes partant de chaque origine.
4) La liste des groupes dînant à chaque correspondance.
5) La liste des véhicules partant de chaque ville.

6. CONCLUSION

La planification stratégique et opérationnelle du transport longue distance pour le projet ONET posait un défi intéressant à l'équipe du C.R.T. Il s'agissait de résoudre un problème qui semblait apparenté aux problèmes de fabrication de tournées et pour lequel n'existait pas d'expertise théorique ou empirique.

Nous devions aussi fonctionner à l'intérieur d'un échancier très serré, quatre à cinq mois séparant notre intervention du départ des participants.

Six semaines après le début de notre action, nous avons mis à la disposition d'ONET le module de planification stratégique et nous terminions le module de planification opérationnelle au moment où ONET a pris fin. Comment expliquer des résultats aussi rapides?

Il semble que la partie ait été jouée au niveau de la modélisation du problème. En effet, chaque origine étant un dépôt contenant autant de

véhicules que nécessaire, tous les sous-tours sont des tournées valides. Le problème est donc plus facile à résoudre qu'un m-commis-voyageur où il faut éliminer les sous-tours ne passant pas par le dépôt. La relaxation du coût fixe et des contraintes de longueur des tournées ramène alors le problème à la solution de deux problèmes de réseau. Nos résultats démontrent qu'il était facile, à partir de la solution du modèle de réseau, de construire une solution satisfaisant les contraintes relaxées à un coût supplémentaire pratiquement négligeable. Nous pouvions donc nous appuyer sur des algorithmes économiques et fiables. Il devenait alors possible de réaliser le développement très rapidement.

REMERCIEMENTS

Nous voudrions remercier M. Benoît Courteau et M. Jacques Soumis de ONET 85 pour leur collaboration, ainsi que M. Réjean Lessard pour l'algorithme de couplage et le support technique.

RÉFÉRENCE

[1] LESSARD, R., MINOUX, M. et ROUSSEAU, J.-M. (1985), A New Approach to General Matching Problems Using Relaxation and Network Flow Sub-Problems. Publication #423, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

FIGURES

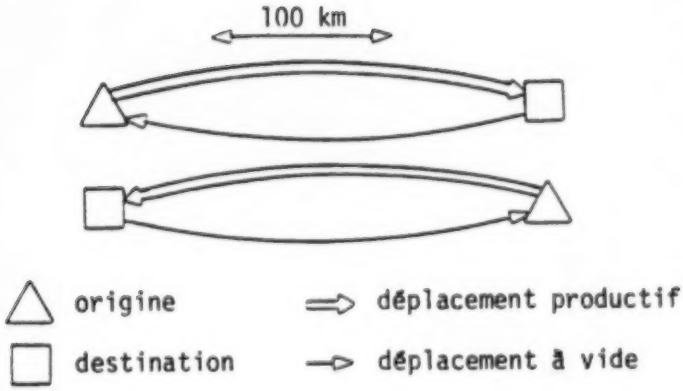


FIGURE 1

Solution avec dépaysement si déplacement à vide gratuit

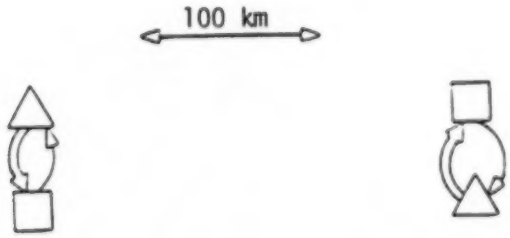


FIGURE 2

Solution sans contrainte de dépaysement

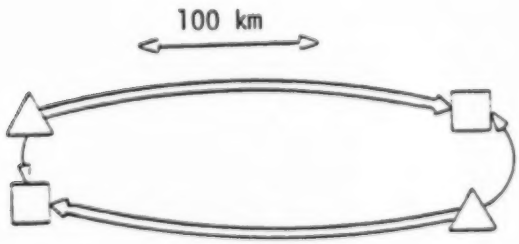
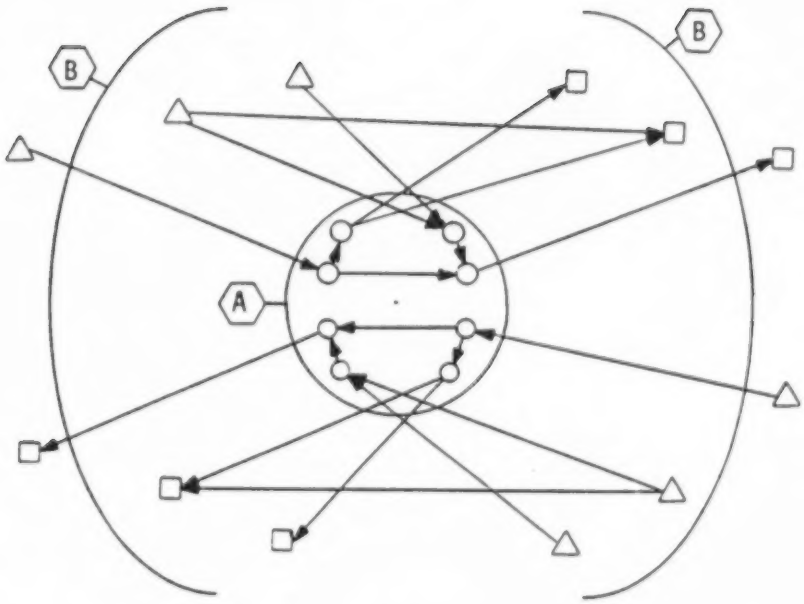


FIGURE 3

Solution avec dépaysement et facturation au kilomètre



○ noeud correspondance
△ origine
□ destination
⟨A⟩ correspondance
⟨B⟩ limite des 100 km

FIGURE 4

Structure des correspondances et réseau associé

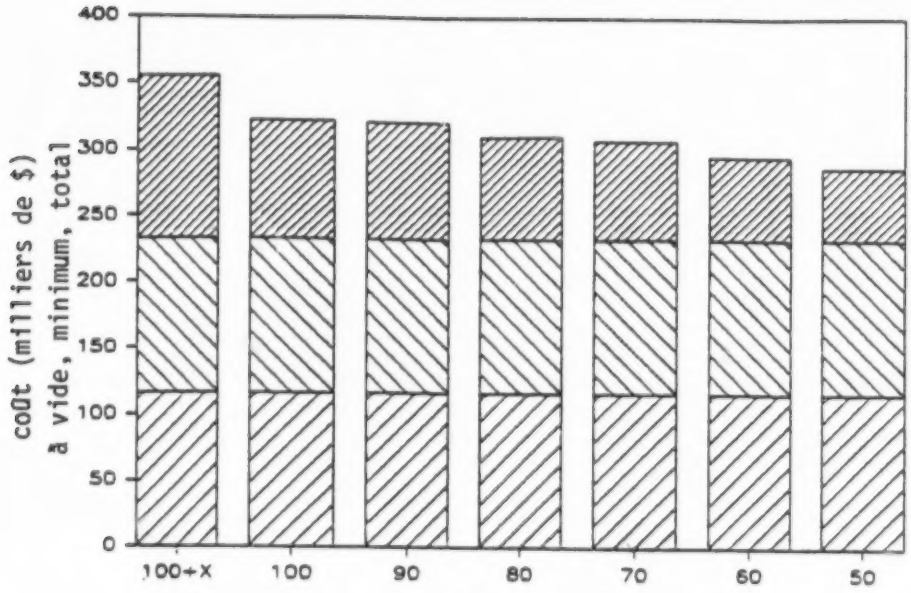


FIGURE 5

Coût total selon le dépaysement exigé
pour le scénario d'hébergement D4

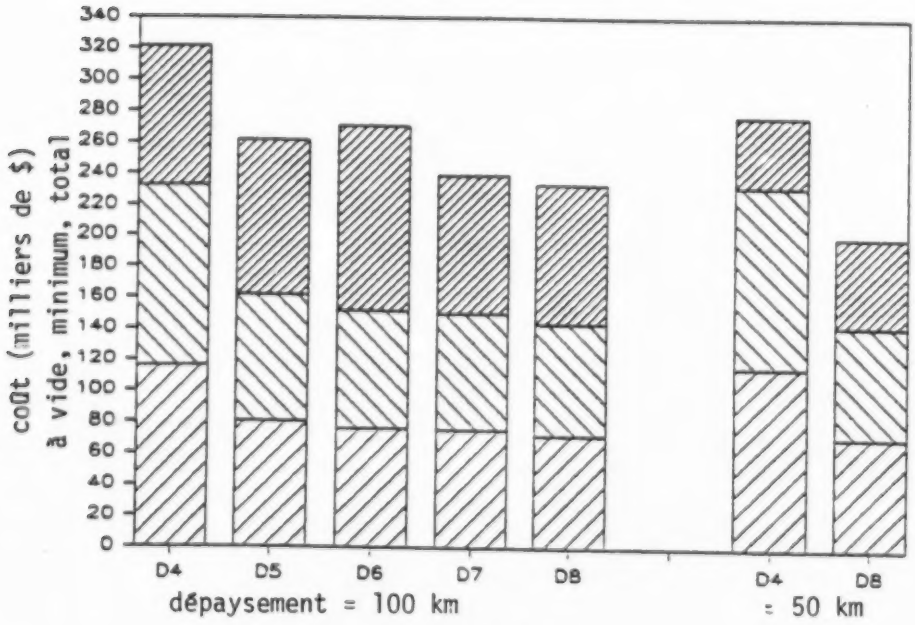


FIGURE 6

Coût total pour différents scénarios
d'hébergement et de dépaysement

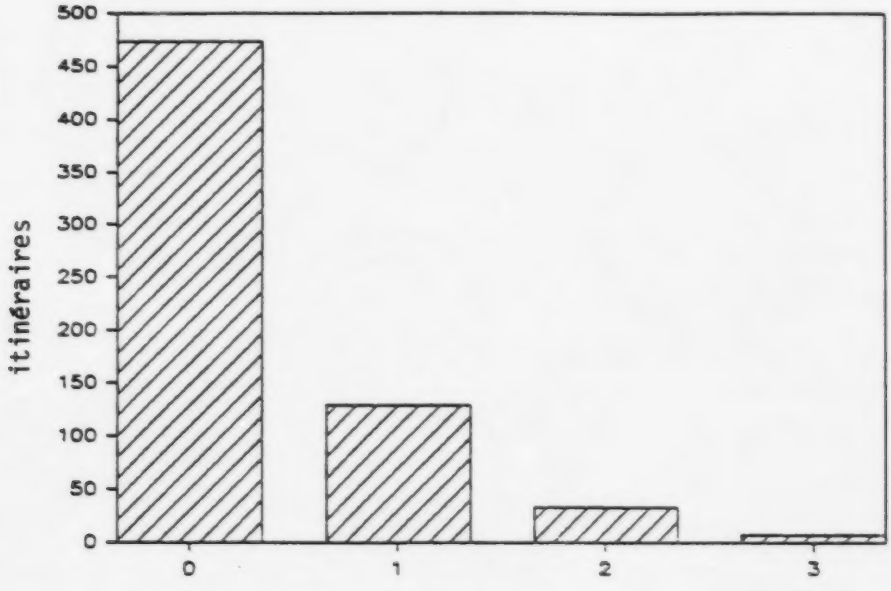


FIGURE 7

Distribution des itinéraires selon
le nombre de correspondances - Scénario D4

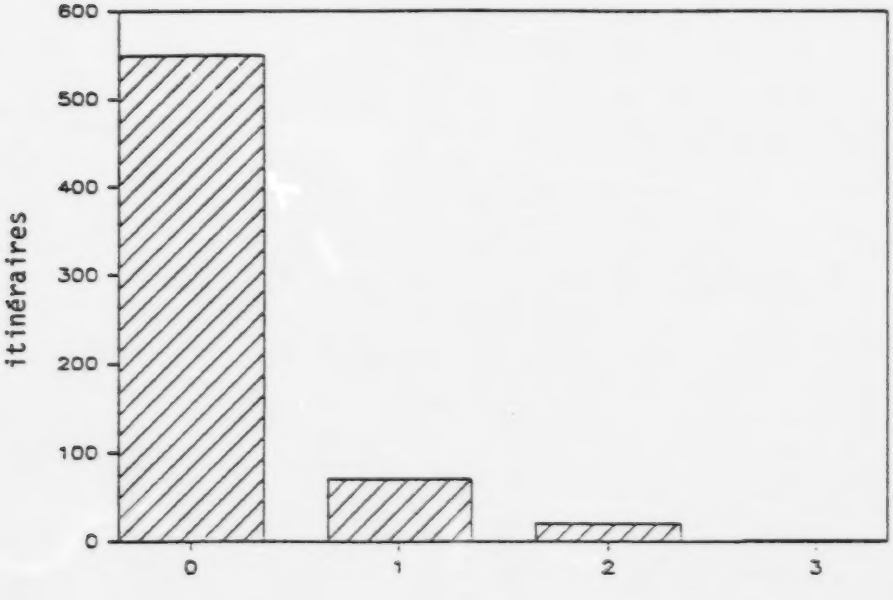


FIGURE 8

Distribution des itinéraires selon
le nombre de correspondances - Scénario D8

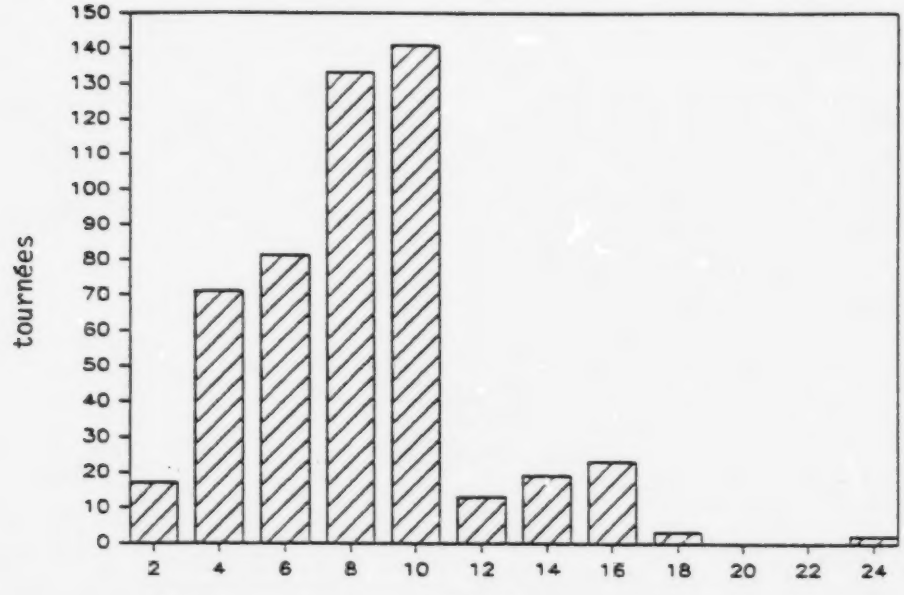


FIGURE 9

Distribution des tournées selon
la durée en heures, scénario D4, avant fusion-fission

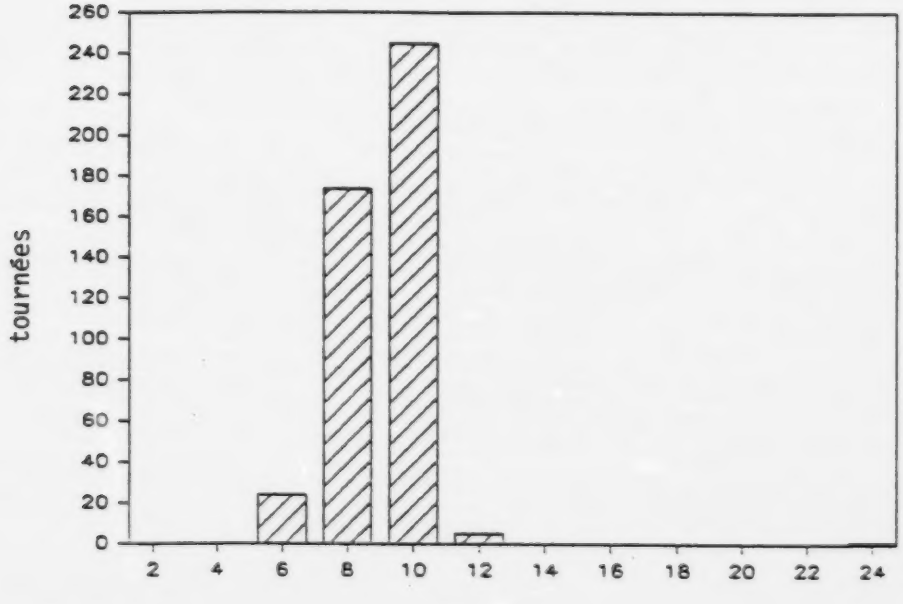


FIGURE 10

Distribution des tournées selon
la durée en heures, scénario D4, après fusion-fission

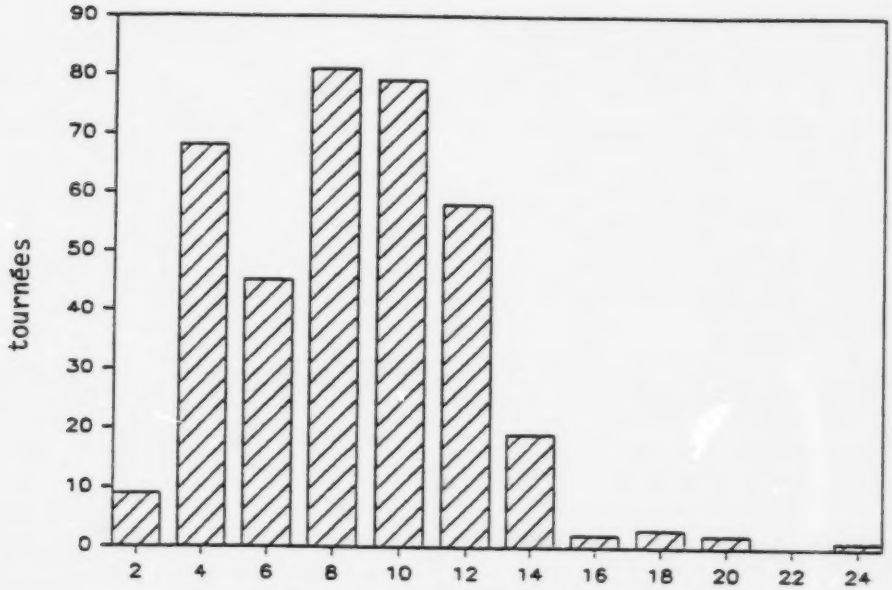


FIGURE 11

Distribution des tournées selon
la durée en heures, scénario D8, avant fusion-fission

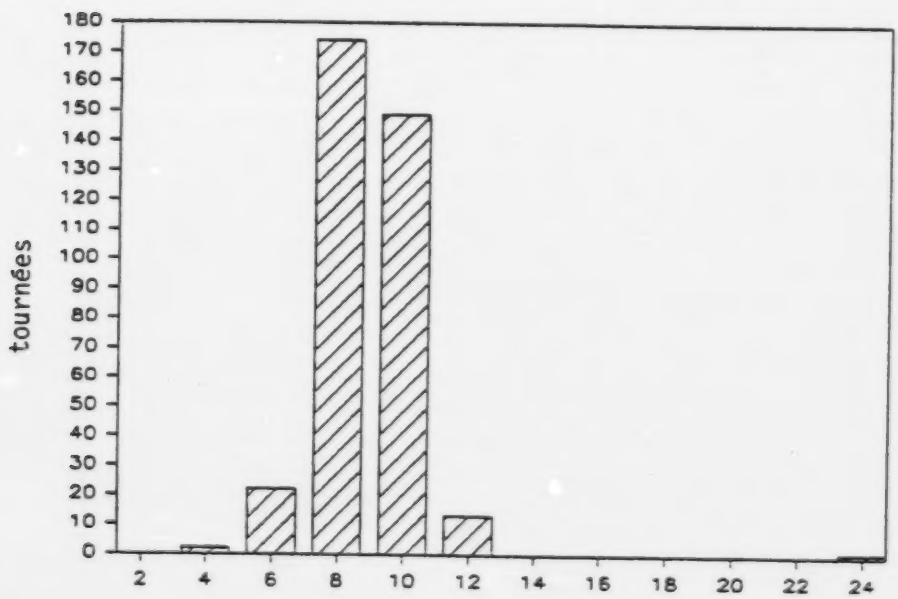


FIGURE 12

Distribution des tournées selon
la durée en heures, scénarion D8, après fusion-fission

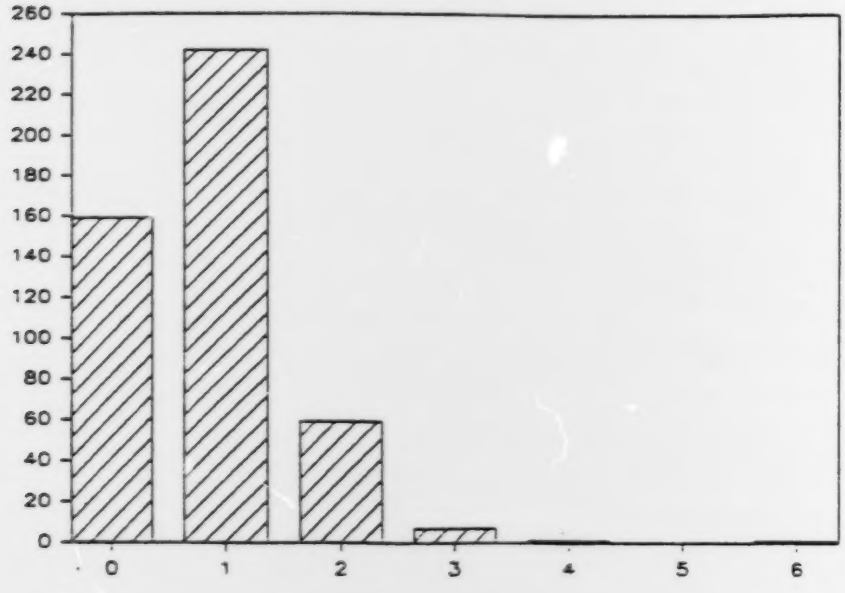


FIGURE 13

Distribution des tournées selon le nombre de déplacements appartenant à un itinéraire avec correspondances - Scénario D4

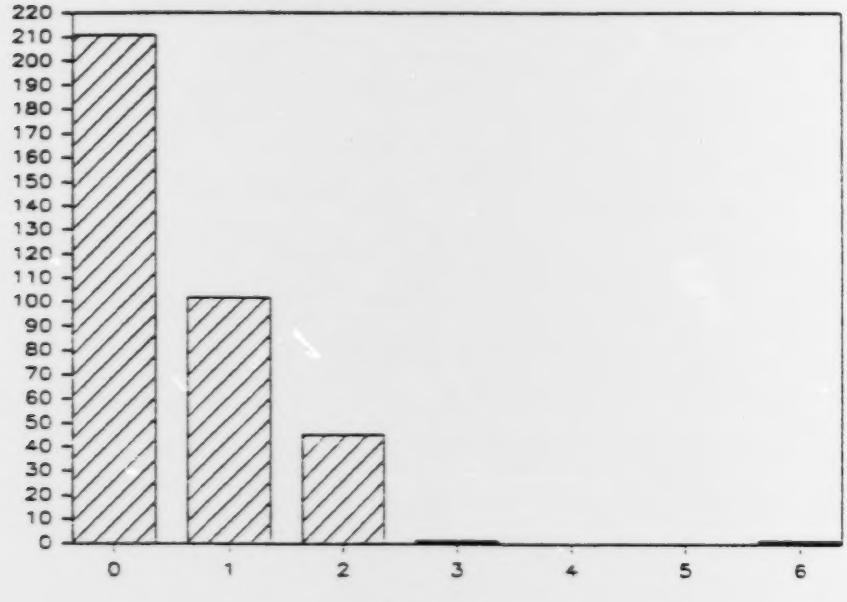


FIGURE 14

Distribution des tournées selon le nombre de déplacements appartenant à un itinéraire avec correspondances - Scénario D8